



Sveriges lantbruksuniversitet  
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för mark och miljö

## Markpackning

– påverkan på markens fysikaliska egenskaper

*Soil compaction*

– *effects on soil physical properties*

Robert Ekholm



Magisteruppsats i markvetenskap  
Agronomprogrammet – inriktning mark/växt

Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU  
2016:14

Uppsala 2016



# Markpackning

## – påverkan på markens fysikaliska egenskaper

Soil compaction  
– effects on soil physical properties

*Robert Ekholm*

**Handledare:** Johan Arvidsson, institutionen för mark och miljö, SLU  
**Biträdande handledare:** Ingrid Wesström & Abraham Joel, institutionen för mark och miljö, SLU  
**Examinator:** Nicholas Jarvis, institutionen för mark och miljö, SLU

**Omfattning:** 30 hp  
**Nivå och fördjupning:** Avancerad nivå, A1E  
**Kurstitel:** Självständigt arbete i markvetenskap - magisterarbete  
**Kurskod:** EX0429  
**Program/utbildning:** Agronomprogrammet – inriktning mark/växt 270 hp

**Utgivningsort:** Uppsala  
**Utgivningsår:** 2016  
**Omslagsbild:** Dumper i packningsförsök på Säby, Ultuna egendom, foto institutionen för mark och miljö, SLU  
**Serietitel:** Examensarbeten, Institutionen för mark och miljö, SLU  
**Delnummer i serien:** 2016:14  
**Elektronisk publicering:** <http://stud.epsilon.slu.se>

**Nyckelord:** jordbearbetning, markpackning, markfysik

Sveriges lantbruksuniversitet  
Swedish University of Agricultural Sciences

Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap  
Institutionen för mark och miljö



## Abstract

Soil compaction has become a growing problem in agriculture due to the use of larger and heavier machines. Compaction reduces the porosity in soil and increases the dry bulk density. This can decrease permeability, increase penetration resistance and also reduce microbiological activity. These changes can in turn lead to impaired growth of roots, increased surface erosion, increased power requirement and lack of oxygen. In this work, the effects of soil compaction on physical properties were studied.

In two randomized block experiments packed with a dumper, several measurements were conducted to study the effects of compaction on the topsoil as well as the subsoil. The field trials with trial numbers 7119-758 and 7119-759 were located in Säby, Ultuna. Within the trial plots, measurements of penetration resistance and shear vane resistance were made. Dye tracing experiments were carried out and, from pits dug inside the plots, soil samples were taken from depths of 10, 30, 50 and 70 cm to measure hydraulic conductivity, pre-consolidation stress, porosity and strength of the aggregates. Plant numbers and yields were also measured at prior to compaction.

The results showed significant differences in the topsoil between the packed treatments and control stages for penetration resistance, shear strength, pre-consolidation stress, hydraulic conductivity, and aggregate strength. The differences in dyeing of the soil profile showed for one trial, 7119-759, a tendency toward significance in the subsoil at both 30 and 50 cm depth. The same was true for penetration resistance and shear strength at 50 cm in trial 7119-759.

In summary, it can be noted that for all depths there were differences between the packed and control treatments that showed that soil compaction had occurred. Soil samples from the 50 and 70 cm depths exhibited statistically significant changes to a lesser extent. Yield reductions amounting to 36% in packed plots suggest that the changes of physical properties of the soil induced by the compaction, individually or collectively, have resulted in poorer growth conditions for the crop.

## Sammanfattning

Markpackning har blivit ett växande problem inom lantbruket på grund av användningen av allt större och tyngre maskiner. Vid markpackning, som i fysikaliska termer definieras som en volymminskning av en viss mängd jord kopplat till en minskad porositet, ökar den torra skrymdensiteten. Detta medför att flera av jordens egenskaper försämras såsom till exempel genomsläpplighet och penetrationsmotstånd samt att den mikrobiologiska aktiviteten minskar. Dessa förändringar kan i varierande utsträckning bland annat leda till försämrade tillväxt för rötter, ökad yterrosion, ökat dragkraftsbehov och syrebrist. I detta arbete har effekterna av markpackning på skörden studerats.

I två randomiserande blockförsök som packats med dumper har flertalet mätningar utförts för att studera effekterna av packningen i såväl matjorden som alven. Försöken med försöksnummer 7119-758 och 7119-759 var förlagda till Säby, Ultuna egendom (Uppsala). Inom provrutorna har penetrations- och vingborrsmätningar utförts. Via provgropar togs jordprover ut från 10, 30, 50 och 70 cm djup och även en infärgning av profilen gjordes. Jordproverna kunde sedan i laboratorium användas för mätning av hydraulisk konduktivitet, förkonsolideringstryck, porositet och aggregathållfasthet. Även plantantal och skörd mättes inledningsvis.

Resultaten visade signifikanta skillnader i matjorden mellan packade led och kontrollled för penetrationsmotstånd, skjuvhållfasthet, förkonsolideringstryck, hydraulisk konduktivitet och aggregathållfasthet. Skillnaderna vid infärgning av markprofilen hade för det ena försöket, 7119-759, endast tendens till signifikans i alven för både 30 och 50 cm djup. Detsamma gällde för penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet vid 50 cm i försök 7119-759.

Sammanfattningsvis kan noteras att det fanns skillnader mellan packade led och kontrollled för samtliga djup som visar att en packning av jorden har skett. Proven från 50 respektive 70 cm djup uppvisade statistiskt säkerställda förändringar i mindre omfattning. Skördenedsättningen som uppgick till 36 % i packade led talar för att de olika markfysikaliska egenskaperna som påverkats vid packningen, enskilt eller sammantaget, har lett till försämrade förutsättningar för grödan.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

### **Vad händer i jorden när tunga maskiner orsakar markpackning? En studie i markfysikens värld.**

**Kan man mäta förändringar i jorden efter bara en överfart med en tung maskin? Svaret är ja, men förändringarna längre ner på djupet i jorden är svåra att upptäcka. Denna studie visar att jorden efter att ha körts över med tung maskin blev mer kompakt, svårare att tränga igenom för både rötter och vatten. Förändringarna som maskinen åstadkom ledde till att skörden efterföljande år minskade med upp till 36 %.**

Att åkermark packas av tunga maskiner och därigenom försämras i miljö- och odlarhänseende har länge oroat både odlare och forskare. Det lömska med markpackning är att effekterna inte nödvändigtvis behöver vara tydliga samtidigt som dessa kan påverka odlingen under lång tid. För att jorden ska fungera och grödan som odlas i den ska växa och ge skörd så behöver rötterna kunna ta sig ner på djupet, vatten ska kunna passera genom jorden och inte bli stående eller rinnande längs ytan vilket kan föra bort näring. Jordens djur och mikroorganismer är precis som rötterna beroende av luftens syre i marken för att kunna omsätta jordens organiska material och därigenom frigöra näringsämnen. Det är därför viktigt ur många synvinklar att packningen och dess effekter studeras och begränsas.

Genom en rad mätningar dels i fält och dels med jordprover i laboratorium visar denna studie att överfarten med en tung maskin faktiskt orsakat förändringar. Platsen för försöket är en lerjord på Säby, Ultuna egendom, och maskinen som användes är en dumper vars marktryck motsvarar trycket från en stor sockerbetsupptagare. I matjorden som det översta jordlagret kallas blev jorden mer svår genomtränglig för mätutrustningen där maskinen kört och jordens aggregat, d.v.s. jordklumparna var svårare att få sönder. Det fanns också skillnader i vattnets förmåga att rinna genom jorden. Men i många mätningar var det svårt att se skillnader mellan de behandlade leden och kontrollerleden, speciellt på de djupare mätningarna. Det är just förändringarna på djupet i jorden som anses vara allvarligast eftersom de är svåra att påverka mekaniskt med redskap men också sällan nås av tjälen under vintern som visat sig ha en reparerande effekt på packad jord.

Det faktum att skörden i försöket som mättes året efter körningen med tung maskin minskade med upp till 36 % i de behandlade leden talar för att de olika egenskaperna i jorden som påverkats vid körningen, enskilt eller sammantaget, har lett till försämrade förutsättningar för grödan.





## Innehåll

1. Inledning och syfte .....	7
2. Bakgrund .....	7
2.1 Markpackning och markfysikaliska egenskaper .....	7
2.2 Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet .....	8
2.4 Skrymdensitet och porositet .....	9
2.5 Förkonsolideringstryck .....	9
2.6 Hydraulisk konduktivitet .....	9
2.7 Infärgning av markprofilen .....	11
3. Material och Metoder .....	12
3.1 Försöksplatser .....	12
3.2 Penetrations- och vingborrsmätningar .....	13
3.3 Jord- och aggregatprover .....	13
3.4 Infärgning av markprofilen .....	13
3.5 Statistisk analys .....	14
4. Resultat .....	15
4.1 Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet .....	15
4.2 Porositet .....	16
4.3 Förkonsolideringstryck och deformation .....	17
4.4 Hydraulisk konduktivitet .....	18
4.5 Aggregathållfasthet .....	19
4.6 Infärgning av markprofilen .....	20
4.7 Skördedata .....	21
5. Diskussion .....	22
5.1 Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet .....	22
5.2 Hydraulisk konduktivitet .....	22
5.3 Förkonsolideringstryck och deformation .....	23
5.4 Porositet .....	23
5.5 Aggregathållfasthet .....	23
5.6 Infärgning av markprofilen .....	24
6. Slutsatser .....	25
7. Referenser .....	26



## 1. Inledning och syfte

Markpackning inom jordbruket är ett resultat av den mekanisering som har skett sedan mitten av 1900-talet, en utveckling som karaktäriseras av tyngre och mer avancerade maskiner. När jorden packas ökar dess skrymdensitet och effekterna är flertaliga och har varierad innebörd för såväl miljön som för växtodlingen i sig. Rötterna får svårare att växa i alltför packad jord, transporten av vatten och luft i jorden försvåras och förutsättningarna för markens mikroorganismer försämras. Miljön påverkas vid markpackning genom en ökad risk för ytvavrinning och ett ökat dragkraftsbehov vid jordbearbetning.

Detta arbete syftar till att studera en rad olika fysikaliska egenskaper i jorden och hur de förändras vid markpackning. Utöver en litteraturstudie har åtta olika egenskaper studerats i fält och i laboratorium genom olika mätningar och prover från olika djup i två försök på Säby, Ultuna egendom i Uppsala. En del egenskaper är nära kopplade till varandra och sammantaget har alla en potentiell påverkan på den odlade grödan.

## 2. Bakgrund

För att lättare förstå de olika fysikaliska egenskaperna som kan förändras vid markpackning och hur dessa i sin tur påverkar lantbrukets grödor följer en bakgrund med samlad fakta kring dessa egenskaper och de mätmetoder som ingår i denna studie.

### 2.1 Markpackning och markfysikaliska egenskaper

Markpackning uppstår när marken utsätts för ett tryck eller i fysikalisk mening en belastning och kan i fysikaliska termer definieras som en volymminskning av en viss mängd jord kopplat till en minskad porositet och en ökad torr skrymdensitet (Håkansson, 2000). Inom jordbruket har åkermarken i varierande grad utsatts för packning ända sedan mekaniseringen startade under 1900- talets första årtionden.

Packning av produktiv åkermark påverkar en mängd egenskaper i marken varav de flesta i negativ riktning med avseende på växtodling och dess miljöpåverkan. Grödans rötter får svårare att penetrera jorden, vatten får svårare att passera genom profilen vilket leder till en ökad ytvavrinning och erosionsrisk, lufttillgången till rötter och marklevande organismer försämras. Dragkraftsbehovet vid bearbetning ökar i packad jord på grund av en ökad hållfasthet i jorden (Myrbeck et al., 2003).

Omfattningen av packningen är knutet till olika rådande faktorer, däribland jordart, markfuktighet, marktrycket från maskiner och antalet överfarter och därför varierar problematiken med markpackning med olika lokala mark- och klimatförhållanden samt jordbrukets inriktning (Håkansson, 2000).

## 2.2 Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet

Penetrationsmotståndet i marken återspeglar hur lätt grödans rötter kan tillväxa och därför är mätningar av det en vanlig del inom markfysiken. Rötterna tillväxer snabbast ner i profilen genom sammanhängande makroporer, sprickor och bioporer (gamla mask- och rotkanaler). Vid markpackning minskar i varierande grad makroporeernas storlek varpå rottillväxten försvåras (Håkansson, 2000). För grödans upptag av vatten och näringsämnen krävs dock att rötterna delvis har intim kontakt med jorden varpå en allt för lucker jord inte är optimalt för grödors tillväxt (Arvidsson och Pettersson, 1995).

Vid mätning av penetrationsmotståndet används en penetrometer. Principen för denna är att en spetsförsedd stav förs ner i jorden och det motstånd som uppstår registreras tillsammans med djupet i en datorenhet som staven är fäst i. Spetsens diameter kan variera men måste överstiga stavens diameter för att motståndet som registreras ska motsvara motståndet kring spetsen och inte väsentligt påverkas av friktion från staven (Håkansson, 2000).

Penetrationsmotståndet ges i följande ekvation:  $Q = F / A$  där  $Q$  är penetrationsmotståndet ( $N/m^2$ ),  $F$  är kraften ( $N$ ) för att trycka ner penetrometers spetsförsedda stav i jorden och  $A$  är spetsens tvärsnittsarea ( $m^2$ ). Ett högt uppmätt penetrationsmotstånd behöver inte vara direkt korrelerat till ett högt motstånd för rottillväxt bl. a. beroende på att rötterna väljer en varierad väg i höjd och sidled ner i profilen och utnyttjar som ovan nämnt makroporer och maskgångar. Uppmätta penetrationsmotstånd på 0,8- 5 MPa har i försök visat sig helt stoppa rottillväxt och variationen är kopplad till bland annat jordart och gröda (Bengough och Mullins, 1990). För lättare mineraljordar av enkelkornsstruktur gäller de lägre penetrationsmotstånden eftersom rötterna tvingas växa genom mer homogen jordmassa p.g.a. frånvaron av sprickor och makroporer (Håkansson, 2000).

Mätningar av penetrationsmotståndet är vanlig vid försök med varierande marktryck och jordbearbetning för att utreda markpackningens omfattning. I ett försök med olika ringtryck i odling med och utan plöjning kunde Arvidsson och Feiza (1995) visa att penetrationsmotståndet i marken vid plöjningsfri odling ökade signifikant på 15- 30 cm djup. Variationerna i ringtryck hade dock en försumbar inverkan på penetrationsmotståndet. I försök med endast varierade däcktyp och ringtryck för mätningar av packningens påverkan på markens fysikaliska egenskaper ses dock ett tydligt samband mellan ökat ringtryck och ökat penetrationsmotstånd, störst var sambandet i matjorden (3,5- 21 cm) och i det översta skiktet i alven (35- 50 cm) (Arvidsson, 1996). Kouwenhoven et al. (2002), visade att grund plöjning (7 cm) i ett långliggande försök med djup och grund plöjning ger ett ökat penetrationsmotstånd i matjorden ner till konventionellt plogdjup (13- 25 cm) men ett något lägre penetrationsmotstånd ner i alven (30- 50 cm).

Skjuvhållfastheten i jorden mäts vanligen med en s.k. vingborr bestående av en metallstav med fyra vingar. Denna slås ner i jorden till det avsedda mätdjupet varpå den vrids och via handtaget kan vridmomentet ( $T$ ) för vridningen avläsas (Håkansson, 2000). Vid vridningen bildas en cylinder vars skjuvning ( $\tau_f$ ) man beräknar genom ekvation 1 där  $r_v$  är radien på den skjuvade cylindern och  $h$  är höjden på cylindern (Gustafsson et al., 2003).

$$\tau_f = \frac{T}{2\pi r_v^2 \left( \frac{2}{3} r_v + h \right)} \quad [1]$$

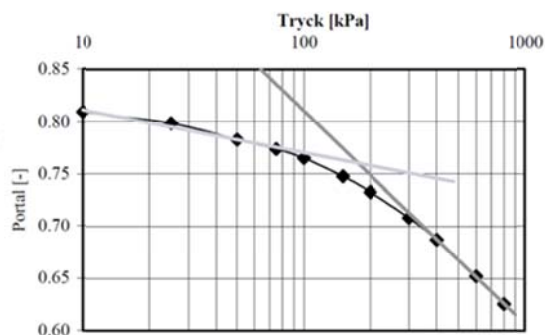
## 2.4 Skrymdensitet och porositet

Eftersom markpackning definieras som en volymminskning av en viss mängd jord är mätningar av jordens skrymdensitet och porositet av stort intresse eftersom dessa faktorer ger ett mätvärde på själva volymminskningen, packningen. Jordens torrskrymdensitet är jordens torrmasa per enhet av dess totala volym (Håkansson, 2000). Porositeten är volymsandelen porer av jordens totala volym. Vid beräkningar av porositeten behöver man även känna till kompaktensiteten som är densiteten hos den fasta substansen i jorden (Håkansson, 2000). Alakukku (1997) visade i en studie med alvpackning att skrymdensiteten ökade med 6- 8 % ner till 40 respektive 45 cm djup i packade led på lerjord efter packning med 21 ton boggieaxelvikt och 800 kPa ringtryck, ett led med en överfart och ett led med tre överfarter. Försöket gjordes också på en mjälajord med resultatet 9 respektive 12 % ökad skrymdensitet för packade led.

## 2.5 Förkonsolideringstryck

En metod för att bedöma markens känslighet för packning är mätning av förkonsolideringstrycket. Detta är ett gränsvärde för trycket som verkar på marken och avgör om deformationen är plastisk eller elastiskt. Om trycket vid belastning av marken är högre än dess förkonsolideringstryck sker således en plastisk deformation med mer bestående och ibland långvariga effekter på marken som följd (Keller och Arvidsson, 2001). För att förhindra bestående packning av marken under plöjningsdjup (alven) får inte marktrycket från maskinöverfarter överskrida alvens aktuella förkonsolideringstryck vilket innebär att axelbelastningen måste begränsas (Håkansson, 2000). Ett gränsvärde för axelbelastningen har länge varit 6 ton för enkla axlar och 8 ton för dubbla axlar för att förhindra bestående packning av alven vid fuktiga förhållanden (Danfors, 1994). Vidare konstaterade Danfors (1994) att en sänkning av ringtrycket i däckan endast marginellt påverkar packningen av alven och att därför de gamla rekommendationerna för axelbelastningar bör finnas kvar även om moderna däck med låga ringtryck används.

Den mest använda metoden på laboratorium för beräkning av förkonsolideringstrycket är den så kallade Ödometer-metoden. Denna metod innebär att jordprover i cylindrar utsätts för varierande tryck under förbestämda tider varpå deformationen avläses och plottas i ett diagram med log tryck och deformation eller portal (se figur 1, Keller och Arvidsson, 2001).



Figur 1. Log tryck- portaldiagram.

Jordens hydrauliska konduktivitet, eller genomsläpplighet, är en viktig markfysikalisk egenskap (Larsson, 2008). Denna beräknas med Darcys lag enligt ekvation 2;

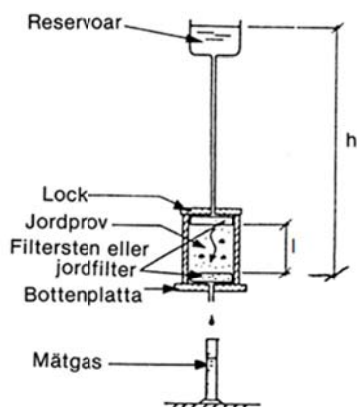
$$v = k \cdot i = k \cdot (h / l) \quad [2]$$

där;

- $v$  = genomsnittlig strömningshastighet, (m/s)
- $k$  = hydraulisk konduktivitet, (m/s)
- $i$  = hydraulisk gradient, (sortlöst tal, m/m)
- $h$  = skillnad i totalpotential på sträckan  $l$ , (m)
- $l$  = längd i strömningsriktningen med potentialskillnaden  $h$ , (m)

Den hydrauliska konduktiviteten kan mätas både i fält och på laboratorium. Mätningar i fält går vanligtvis ut på att en dubbelringsinfiltrometer slås ner i jorden varpå vatten tillförs och sjunkhastigheten noteras som genomsläpplighet i fält,  $k_f$  (Arvidsson och Feiza, 1995). Svårigheten med mätningar av genomsläpplighet i fält är att hålla vattenhalten på en önskad jämn nivå under provtagningarna.

Vid mätningar av den hydrauliska konduktiviteten på laboratorium kan olika utrustning användas såsom: rörpermeameter, kompressometer, triaxialapparat eller ödometer (Larsson, 2008). Vanligast inom markfysikaliska mätningar inom jordbruksforskning är dock rörpermeameter (se figur 2) som bygger på att vatten från en reservoar med konstant nivå rinner genom cylinderprovet varpå hastigheten noteras (Larsson, 2008).



Figur 2. Permeameter av rörtyp (Larsson, 2008).

Den oregelbundna spridningen av makroporer, sprickor och maskgångar i jorden kan göra det svårt att mäta hydraulisk konduktivitet i de relativt små jordproven i laboratorium eftersom dessa starkt påverkar resultatet. Till fördelarna med laboratoriemätning av hydraulisk konduktivitet hör att vattenhalten i proverna innan mätning lätt kan kontrolleras och att inga mätfel på grund av horisontell vattenströmning sker (Larsson, 2008).

Vid markpackning påverkas de grova porerna som står för huvuddelen av vatten och lufttransporten i marken negativt varpå den hydrauliska konduktiviteten minskar. Sker detta i större omfattning är risken stor att infiltrationshastigheten blir så låg att ytvatten lätt bildas med erosionsrisk och syrebrist hos grödan som följd (Håkansson, 2000).

I flertalet studier kring ämnet markpackning har mätning av den hydrauliska konduktiviteten genomförts. Myrbeck et al. (2003) visade i en studie av plöjningstidpunktens inverkan på markstrukturen att genomsläppligheten i genomsnitt över platser och år tenderade att vara högre i de tidigt plöjda leden. Dock saknades statistisk signifikans för skillnaderna mellan leden.

I en studie med låga ringtryck i odling med och utan plöjning visade Arvidsson och Feiza (1995) att de plöjningsfria leden i ett av försöken hade en signifikant högre genomsläpplighet från mätningar i fält. Mätningarna av den mättade hydrauliska konduktiviteten i laboratorium visade på signifikant högre genomsläpplighet i plöjda led jämfört med oplöjda före sådd på 13- 23 cm djup på en av försöksplatserna. I övrigt var det endast små skillnader mellan leden för skillnader både i ringtryck och i jordbearbetning.

Försök i Skåne åren 1995- 1997 då packning med sockerbetsupptagare (Arvidsson, 2001) genomfördes visade, dock endast med statistisk tendens, att den hydrauliska konduktiviteten minskade i de packade leden jämfört med kontrollleden, både på 30 och 50 cm djup och på samtliga försöksplatser. Signifikant skillnad erhöles dock på 50 cm djup när medelvärdena från de olika försöksplatserna räknades samman och för båda djupen i försöksplats Sandby.

## 2.7 Infärgning av markprofilen

Vid studier av vattnets rörelse i markprofilen, är infärgning av profilen med ett färgämne löst i vatten en användbar metod (Flury och Fluhler, 1994). De olika delar av makroporsystemet som infärgningsvätskan infiltrerar genom färgas och kan i efterhand studeras. Ett vanligt förekommande färgämne för infärgning av markprofiler är Brilliant Blue vars egenskaper i olika jordar har studerats av Flury och Fluhler (1995). Brilliant Blue är beroende av pH-värdet antingen neutralt eller negativt laddat. Vid pH högre än 5,83 är det negativt laddat ( $pK_A = 5,83$ ). Av studierna framgick att adsorptionsförmågan till jorden hos Brilliant Blue är positivt korrelerad till jordens pH, mängd fritt  $CaCO_3$ , lerhalt, mullhalt och katjonbyteskapacitet. Det innebär att hänsyn bör tas till jordart och markkemiska egenskaper vid jämförelser mellan olika infärgningsförsök. I studierna varierade den uppmätta adsorptionskoefficienten,  $K$ , från 0,16 till 5,95  $dm^3 kg^{-1}$ .

När markens fysikaliska egenskaper, såsom porositet och genomsläpplighet, genom packning eller luckring förändras påverkas även markens kemiska och biologiska egenskaper (Gunnarsson och Rydén, 2007). Detta sker eftersom förändringar i jordens makroporsystem kan påverka faktorer såsom transport, adsorption och nedbrytning av bekämpningsmedel, omsättning och transport av näringsämnen i jonform, bundna i organiskt material eller till olika mineralfraktioner. Makroporssystemet är också helt avgörande för luftväxlingen i marken eftersom de grova porerna luftfylls redan vid låga vattenavförande tryck (Arvidsson och Pettersson, 1995). Sammantaget är olika insatser som påverkar makroporsystemet och flöden av vatten och luft i marken viktiga att studera eftersom det kan påverka många andra egenskaper hos en jord. I skånska försök med infärgning av markprofilen i sockerbetsodling med varierad jordbearbetning visade Gunnarsson och Rydén (2007) att andelen färgad jord

var större i alven vid plöjningsfri odling än vid odling med konventionell plöjning. Yngwe (2007) visade att djup bearbetning till sockerbetor med Imants, ett luckrande redskap med spadar på en roterande axel, på våren gav en signifikant högre andel färg i matjorden än motsvarande behandling på hösten samt plöjning på hösten. I alven fanns efter de båda djupa bearbetningarna en signifikant högre andel infärgad jord än i de plöjda leden, detta gäller dock endast på en av försöksplatserna.

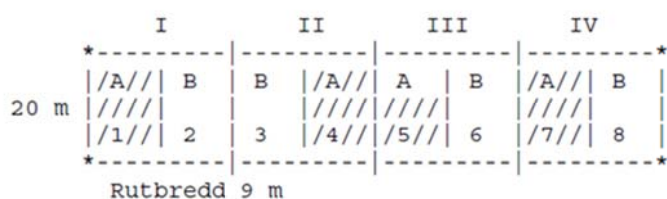
### 3. Material och Metoder

#### 3.1 Försöksplatser

Undersökningarna är utförda i packningsförsök 7119-758 och 7119-759 som startades år 2009 och som är lokaliserade på Säby tillhörande Ultuna egendom i Uppsala. Vidare i detta arbete kommer försöken även att benämnas endast 758 och 759 för att förenkla läsningen. Som framgår av tabell 1 varierar lerhalterna något mellan försöksplatserna. Båda försöken är utlagda som randomiserande blockförsök med fyra block och två försöksled. Varje ruta är 20 \* 9 meter (se figur 3).

Tabell 1. Texturanalys i försök 7119-758, 7119-759 Säby, fraktioner angivna i vikt-%.

Försök	Djup (cm)	Ler	Finmjäla	Grovmjäla	Finmo	Grovmo	Finsand	Grovsand	Mullhalt
758	10	50,0	14,3	15,8	16,5	2,5	1,0	0,0	3,0
	30	50,5	15,3	17,3	13,3	2,3	1,5	0,0	0,3
	50	53,8	15,3	17,0	12,5	1,0	0,3	0,0	0,0
759	10	47,3	15,5	15,8	16,0	5,3	0,0	0,0	3,5
	30	46,5	15,8	16,3	15,5	5,5	0,5	0,0	1,3
	50	46,5	17,0	18,3	14,5	3,0	0,5	0,0	0,3



Figur 3. Skiss över försöksupplägg 7119-758 och 7119-759 Säby. A: Packat med 4 överfarter med dumper. B: Opackat, kontroll.

Försöken hade förfrukterna korn (758) och vall (759) och packades med 4 överfarter den 3 resp. 4 november 2009 med dumper av modell B25 D som lastad vägde 31,7 ton (A led). Viktfördelningen på de tre axlarna var: 11,65 ton (framaxel), 10,8 ton och 9,25 ton. Däckdimension var 23,5 R25 och ringtrycket 430 kPa.

Efter packningen plöjdes båda försöken och såddes under våren 2010 med vårvete. Samtliga mätningar och provtagningar som utförts till detta arbete är gjorda efter skörd från september till november 2010. Alla mätningar på laboratorium har ägt rum på avdelningen för jordbearbetning och hydroteknik på institutionen för mark och miljö, SLU i Uppsala.



### 3.2 Penetrations- och vingborrsmätningar

Mätningar av penetrationsmotståndet utfördes med en penetrometer av modell Eijkelkamp penetrologger med en kon med tvärsnittsarean  $1 \text{ cm}^2$ . Inom varje ruta gjordes 15 stick ner till 50 cm djup med slumpmässig fördelning. Nedtryckningen skedde med en nära konstant låg hastighet för att registreringen av motståndet skulle bli så likvärdig som möjligt mellan och inom försöken.

Vid vingborrsmätningarna användes ett vingborr med r- värde (radien på den skjuvade cylindern) 2,5 cm. Mätningar gjordes på 10 platser per ruta och vardera på 3 djup: 15, 30 och 50 cm. Två olika momenthandtag användes beroende på motståndets omfattning. Det maximala motståndet som krävdes för att vrida vingborren noterades i Nm. För nedslagningen av vingborren i marken användes slägga och för uppdragningen användes en mindre grävmaskin försedd med en enkel ögla.

### 3.3 Jord- och aggregatprover

Jordprover togs ut i cylindrar med höjden 50 mm och diametern 72 mm på följande djup: 10, 30, 50 och 70 cm, fyra cylindrar per djup gav totalt 16 cylindrar per ruta. För att lättare komma ner till de olika djupen grävdes gropar med en mindre grävmaskin med djup och bredd på 1 m och längd 1,5 m.

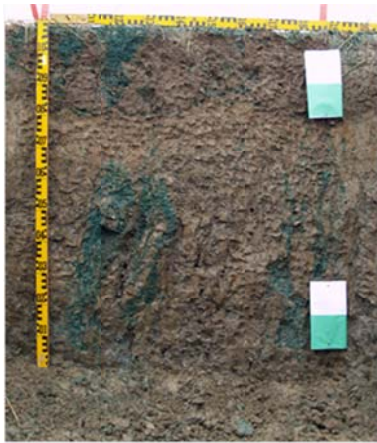
Cylindrarna vattenmättades underifrån på laboratoriet för att sedan mätas i infiltrationsapparat för uträkning av mättad hydraulisk konduktivitet. Efter det sattes cylinderproverna på sandbädd och dränerades till 1 m för att proverna skulle ha en lämplig vattenhalt inför mätningar av förkonsoloderingsstrycket i en så kallad ödometer. Vid dessa mätningar användes 10 olika trycksteg: 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,5, 2, 3, 4, 6, och 8 bar. Varje trycksteg varade 30 min varpå deformationen av proverna noterades. Dessutom fick proverna vila mellan tryckstegen 0,5 och 1 bar för att andelen elastisk deformation skulle kunna noteras. Slutligen torkades proverna i värmeskåp och vägdes för uträkningen av torr skrymdensitet.

Aggregatproverna togs ut från följande djup: 0- 5, 10- 15, 30 och 50 cm. Av dessa finfördelades en del till små aggregat med hjälp av siktar med storlekarna 8 respektive 11,3 mm. De små aggregaten torkades i rumstemperatur och krossades sedan i en maskin för mätning av aggregathållfasthet. Denna maskin gick dock sönder under provtagningen varpå endast aggregat från djupet 0- 5 cm kunde testas. Jord från de ursprungliga aggregaten togs även ut för texturanalys på laboratoriet. Texturanalysen genomfördes för varje block och kompaktdensiteten mättes för uträkning av cylinderprovernas porositet.

### 3.4 Infärgning av markprofilen

En ruta med ytan  $1 \text{ m}^2$  i anslutning till varje provgrop tillfördes 40 mm vatten (40 liter) för att uppnå dräneringsjämvikt och infärgades därefter manuellt med 20 mm (20 liter) infärgningsvätska med koncentrationen 2 g Brilliant blue/ liter vatten. Eftersom regnsimulator eller annan sprututrustning inte fanns att tillgå användes vanliga kannor med duschstril och

tillförseln delades upp så att infärgningsvätska inte blev stående på ytan. Efter ett dygn grävdes tre vertikala provytor fram inom varje infärgat område, dessa putsades med spatel så att en aggregerad yta utan spår av grävredskap kunde erhållas. Provytorna fotograferades (se figur 4) varpå fotona ljusjusterades och en regressionsanalys genomfördes. Genom bildanalys i Image analysis toolbox i MATLAB R2010b kunde andelen färgad jord räknas ut för de olika behandlingarna. Fotograferingen och bildanalysen utfördes av Mats Larsbo, institutionen för mark och miljö, avdelningen för biogeofysik och vattenvård.



Figur 4. Foto av provyta i infärgat försök 7119-759 Säby.

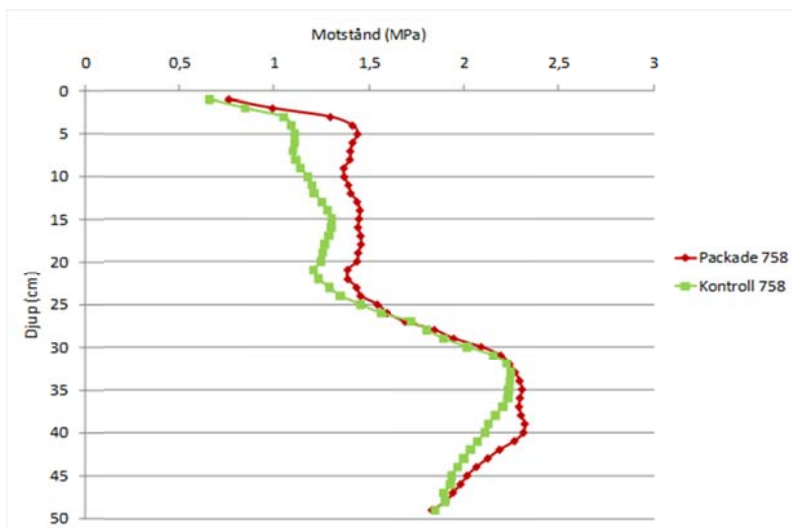
### 3.5 Statistisk analys

För statistisk analys användes programmet Statistical Analysis System, SAS. Vid sannolikhetsvärden,  $p$ , under 0,05 kunde statistiskt säkra signifikanta skillnader mellan leden fastställas. Vid  $p$ -värden mellan 0,05 och 0,15 kunde tendens till skillnader mellan leden fastställas.

## 4. Resultat

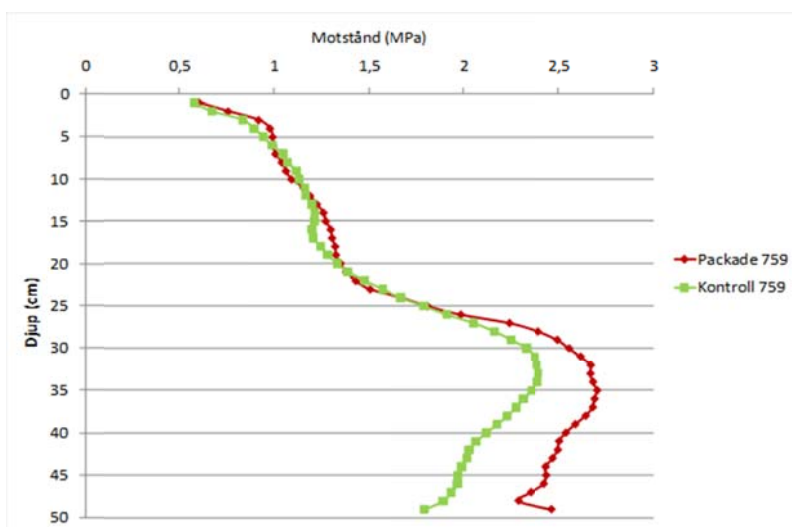
### 4.1 Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet

Mätningarna av penetrationsmotståndet i försök 758 (se figur 5) visar på ett högre motstånd i matjorden och i alven för de packade leden, skillnaderna är signifikant för djupen 5- 10 cm och 15- 20 cm. På djupet 10- 15 cm erhöles ett p-värde på 0,052 och således nära signifikant skillnad. Skillnaderna på djupen kring 40 cm är inte signifikanta.



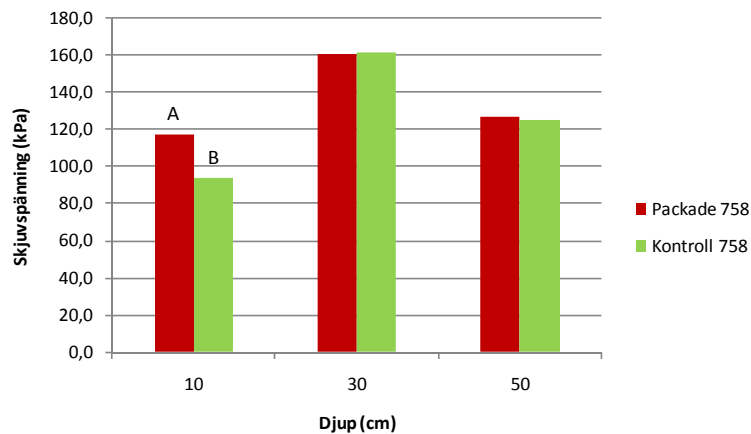
Figur 5. Penetrationsmotstånd i försök 7119-758 Säby.

I försök 759 är det endast små skillnader i penetrationsmotstånd mellan behandlingarna i matjorden och en större skillnad från 30 cm djup och ner i profilen med ett större motstånd i packade led (se figur 6). Den statistiska analysen visar att skillnaderna på djupen 40- 45 cm och 45- 50 cm inte är signifikanta men med p-värden på 0,091 respektive 0,083 så finns det en tendens till skillnad.

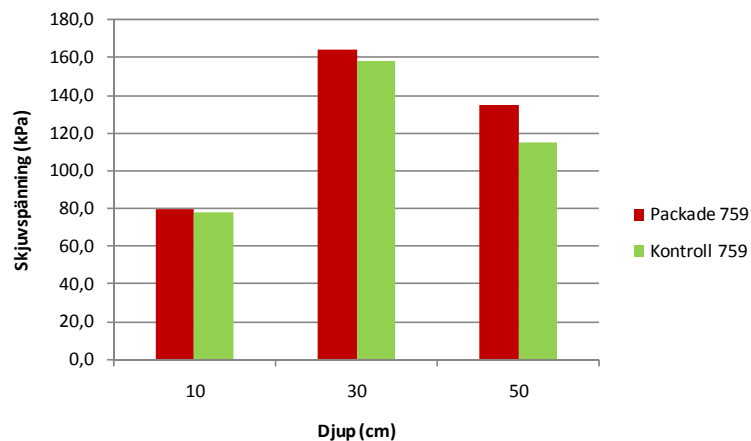


Figur 6. Penetrationsmotstånd i försök 7119-759 Säby.

Skjuvspänningsmätningarna i försök 758 uppvisar en tydlig och signifikant skillnad mellan behandlingarna i matjorden på 10 cm djup med en högre skjuvspänning för de packade leden (se figur 7). För de övriga djupen är skillnaderna små. I försök 759 finns inga signifikanta skillnader på något djup men en viss skillnad på 50 cm djup med en högre skjuvspänning för packade led (se figur 8). Med ett p-värde på  $\sim 0,149$  kan dock endast en tendens ses för skillnaderna på 50 cm djup.



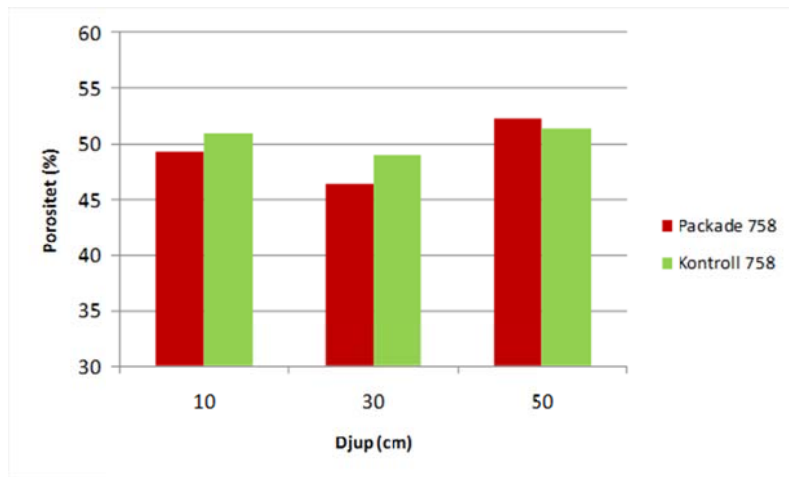
Figur 7. Skjuvspänning vid vingborrsmätning i försök 7119-758 Säby.



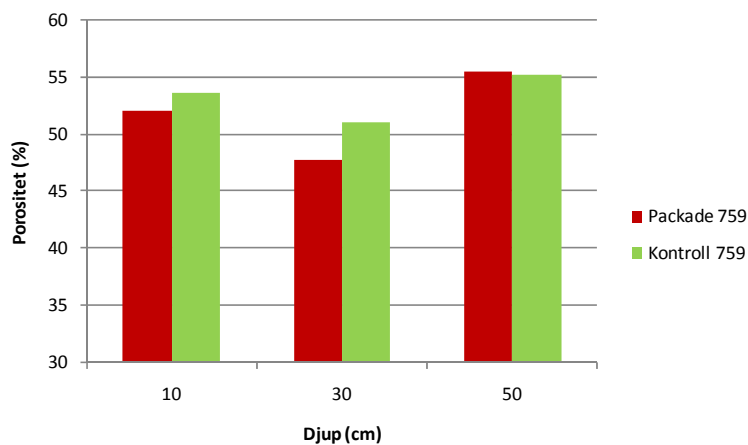
Figur 8. Skjuvspänning vid vingborrsmätning i försök 7119-759 Säby.

## 4.2 Porositet

I figurerna 9 och 10 redovisas resultaten för porositet i försök 758 respektive 759. Skillnaderna är inte signifikanta för något av försöken.



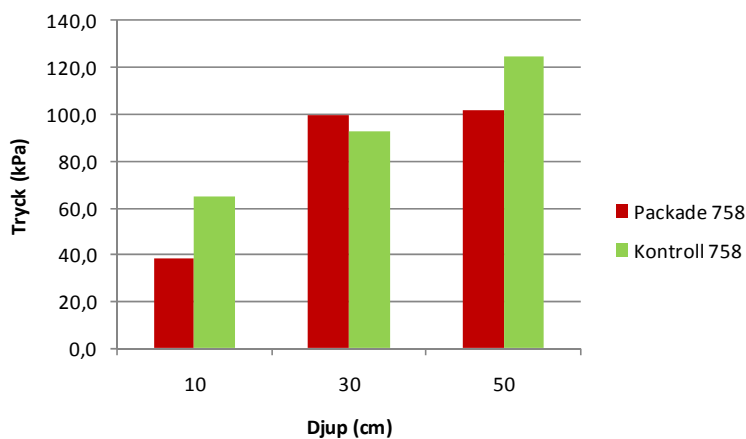
Figur 9. Porositet i försök 7119-758 Säby.



Figur 10. Porositet i försök 7119-759 Säby.

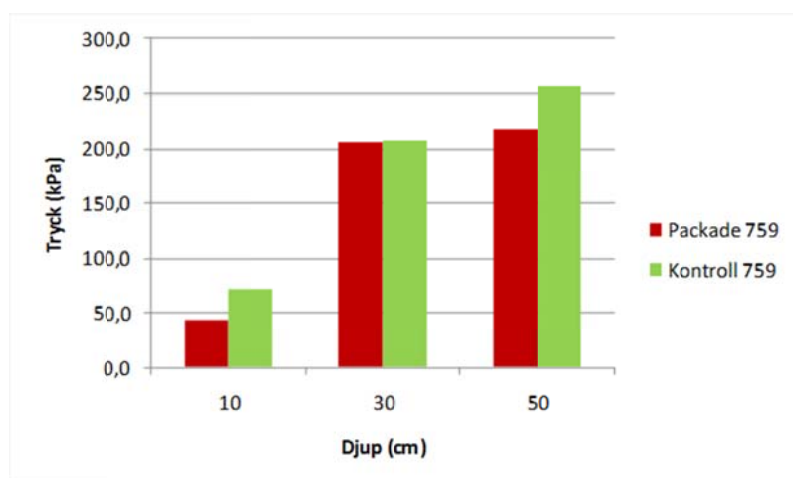
### 4.3 Förkonsolideringstryck och deformation

I försök 758 finns en tendens till ett lägre förkonsolideringstryck på 10 cm djup för packade led (se figur 11) med ett p- värde på 0,14. För 30 och 50 cm djup i försök 758 finns inga skillnader mellan behandlingarna.



Figur 11. Förkonsolideringstryck i försök 7117-758 Säby.

Också i försök 759 finns en tendens till skillnad för matjorden på 10 cm djup med ett lägre förkonsolideringstryck i packade led (se figur 12) och ett p- värde på 0,06. I övriga djup finns inga skillnader i försök 759.



Figur 12. Förkonsolideringstryck i försök 7119-759 Säby.

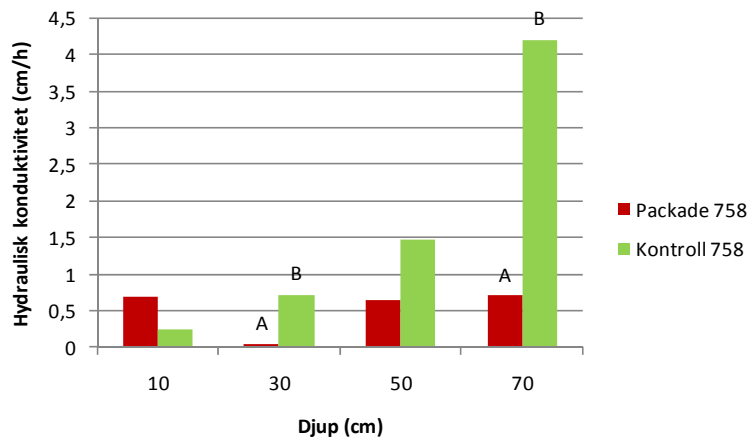
I tabell 2 redovisas deformationen av cylinderproverna från ödometermätningarna vid tryckstegen 1 respektive 8 bar. Det lägre trycket motsvarar ett normalt marktryck vid maskinkörning i fält och det högre trycket är det maximala trycket från mätningarna i ödometern. I försök 758 är deformationen mindre för samtliga packade led. För 759 är deformationen mer varierande men för 30 cm djup, både vid 1 och 8 bar, är den mindre för packade led. Ingen signifikant skillnad finns dock i de två försöken.

Tabell 2. Deformation i mm vid 1 och 8 bars tryck i försök 7119-758 och 7119-759 Säby

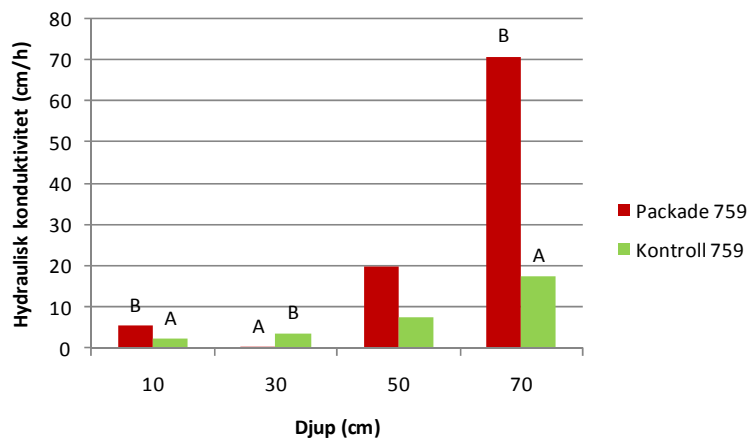
Försök		758		759	
Tryck (bar)	Djup (cm)	Packad	Kontroll	Packad	Kontroll
1	10	2,52	3,00	3,78	3,30
	30	1,39	2,20	1,60	1,98
	50	1,92	2,15	2,25	1,84
8	10	6,45	7,16	9,20	9,29
	30	4,34	6,09	5,53	7,06
	50	6,06	6,55	8,35	7,70

#### 4.4 Hydraulisk konduktivitet

I försök 758 är genomsläppligheten lägre i de packade leden för tre av de uppmätta djupen och med signifikanta skillnader i två: 30 och 70 cm (se figur 13). För 759 ser det annorlunda ut med en signifikant högre genomsläpplighet i packade led för djupen 10 och 70 cm. Djupet 30 cm uppvisar tvärtom och i likhet med försök 758 en signifikant lägre genomsläpplighet för packade led (se figur 14).



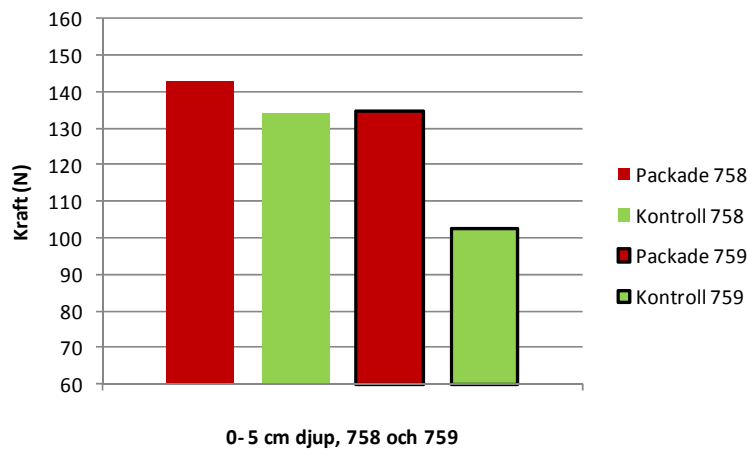
Figur 13. Hydraulisk konduktivitet i försök 7119-758 Säby.



Figur 14. Hydraulisk konduktivitet i försök 7119-759 Säby.

#### 4.5 Aggregathållfasthet

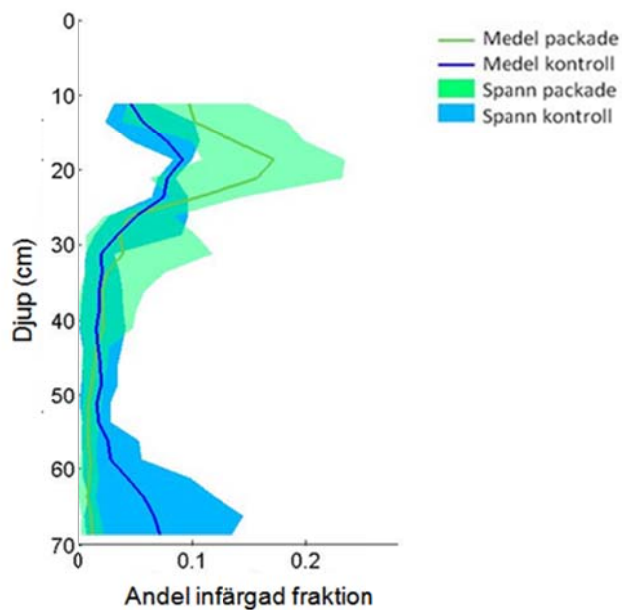
Mätningarna av aggregatens hållfasthet från matjorden visade inga skillnader för 758 men en tydlig och signifikant skillnad för 759 (figur 15).



Figur 15. Aggregathållfasthet i försök 7119-758, 759 Säby.

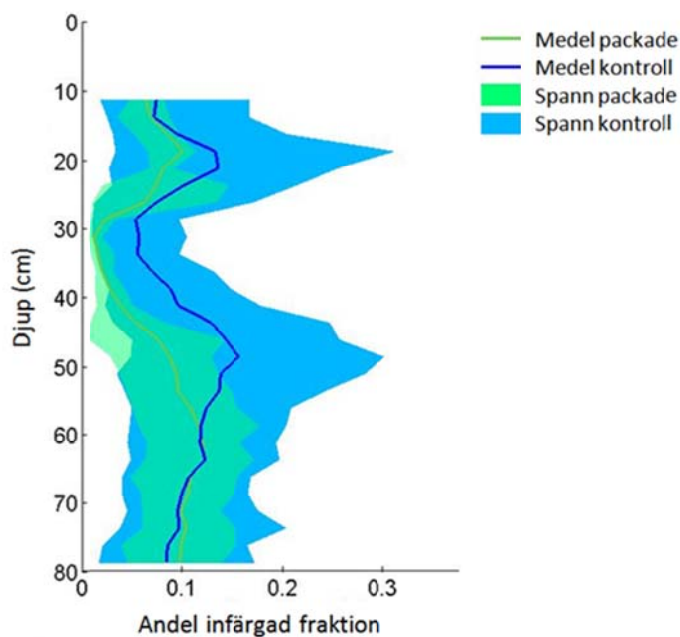
#### 4.6 Infärgning av markprofilen

Figurerna 16 och 17 visar andelen färgad jord ner genom profilen i respektive försök. Linjerna i diagrammen utgör medelvärdena och de helfärgade områdena de intervall som de uppmätta värdena låg inom. Inga signifikanta skillnader finns mellan behandlingarna, dock finns en tendens till mindre andel infärgad jord i packade led ner till 50 cm djup i försök 759. Generellt för båda behandlingar i båda försöken är att andelen färgad jord tenderar att minska från 20 cm djup ner till omkring 30 cm djup för att sedan öka ner till cirka 50 cm djup.



Figur 16. Infärgning av profilen i försök 7119-758 Säby.





Figur 17. Infärgning av profilen i försök 7119-759 Säby.

#### 4.7 Skördedata

I tabell 3 redovisas skördedata från försök 758 och 759. De packade leden uppvisar i båda försöken en signifikant minskning av skörden i jämförelse med kontrollen. Försök 758 med korn som förfrukt hade störst minskning, 36 %. För plantantalet saknas signifikans för skillnaderna.

Tabell 3. Skördedata från försök 7119- 758, 759 Säby

Försök	Behandling	Skörd (kg/ha)	Relativtal skörd	Plantantal/ m <sup>2</sup>
758	Packade	3240	64	503
	Kontroll	5020	100	547
759	Packade	4420	92	453
	Kontroll	4790	100	471

## 5. Diskussion

### 5.1 Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet

I försök 758 ses signifikanta skillnader i matjorden för såväl penetrationsmotstånd som för skjuvspänning (se figur 5 & 7) vilket indikerar att en förändring av jorden skett som följd av behandlingen. Det stämmer med resultat från Arvidsson (2001) där packning med sockerbetsupptagare gav signifikant högre penetrationsmotstånd i matjorden än i opackade led. Vid studier i tidigare försök framgår det att variationer i ringtryck och jordbearbetningsstrategi är de viktigaste faktorerna för matjordens grad av packning. Arvidsson (1996) och Kouwenhoven et al. (2002) visade på en positiv korrelation mellan ökat penetrationsmotstånd i matjorden och ökat ringtryck samt reducerad jordbearbetning utan användande redskap. Arvidsson (1996) visade att ringtrycket kan påverka penetrationsmotståndet även under matjorden där det ökade på 35- 50 cm djup. Packningens verkningar längre ner i profilen i detta försök är mest tydliga i försök 759 med skillnader vad gäller både penetrationsmotstånd och skjuvspänning (se figur 6 & 8). Här visar dock den statistiska analysen att det bara finns tendenser till skillnader. Alakukku (1997) visade att penetrationsmotståndet i alven (25- 45 cm) ett år efter packning var 7 respektive 12 % högre beroende på antalet överfarter som varierade i de två behandlade leden.

Att matjorden i försök 758 uppvisar både högre penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet än motsvarande djup i försök 759 skulle kunna förklaras i skillnader i lerhalt, vattenhalt och förfrukt. 759 hade vall som förfrukt vars rotsvål skulle kunna skydda matjorden något genom att fördela delar av kraften i det horisontella planet från hjulen vid överfart. Dessutom innebär en flerårsvall att jorden redan är mera packad än i försök 758 med korn som förfrukt. Matjorden i 759 har en tre procentenheter lägre lerhalt och motsvarande högre halt grovmo än 758 vilket skulle kunna göra 759 något mindre packningskänslig. Mullhalten i 759 var dessutom efter vallen något högre än i 758 vilket bör minska packningskänsligheten ytterligare. Vid provtagningarna i försök 758 och 759 iaktogs att grundvattnet var högre i försök 758 och mätningarna av den hydrauliska konduktiviteten visar även på en lägre genomsläpplighet överlag för 758 vilket innebär att vattenhalten i 758-profilen sannolikt var högre vid tillfället för packningen, något som talar för ett större utslag av packningen i 758.

### 5.2 Hydraulisk konduktivitet

Resultaten för genomsläppligheten är varierande och endast till viss del förväntade. Skillnaderna i matjorden, som i 759 är signifikanta med en högre genomsläpplighet för packade led, är inte helt förväntade och kan förklaras av att matjorden i de packade leden kan uppträda i större aggregat som ett resultat av den sämre brukbarheten av jorden vilket vid provtagningen kan ge håligheter i provcylindrarna och på så sätt leda till mätresultat med ökad genomsläpplighet.

Myrbeck et al. (2003) nämner i sina resultat att värden på genomsläpplighet från cylindrar med mycket halm eller genomgående maskgångar som kan antas ha uppkommit efter provtagningen plockats bort för att erhålla ett resultat som bättre representerar fältförhållandena. Detta hade nog varit en bra strategi även i detta försök, speciellt eftersom inga mätningar av genomsläppligheten i fält utfördes.

På 30 cm djup är det signifikant lägre genomsläpplighet för packade led i båda försöken, något som kan jämföras med porositeten som på 30 cm djup i båda försöken också är lägre i packade led när försöken slås ihop. För 50 cm djup finns ingen signifikans för skillnader i något av försöken.

På 70 cm djup förväntades inga stora skillnader i genomsläpplighet mellan behandlingarna men resultatet visar på stora skillnader, i försök 759 dessutom med mycket höga värden vilket är svårt att förklara. Rotkanaler och maskgångar kan ha påverkat resultatet på ett missvisande sätt men förklarar inte en statistisk fastställd skillnad.

Resultaten från 30 cm djup överensstämmer med resultaten från Arvidsson (2001) då flera försöksplatser packades med sockerbetsupptagare och axelvikter och ringtryck liknande de som används i detta försök. Arvidsson (2001) visade att genomsläppligheten generellt var lägre i packade led för 30 och 50 cm djup, men endast med signifikans för vissa av provplatserna.

### 5.3 Förkonsolideringstryck och deformation

För matjorden finns signifikanta skillnader i form av ett högre förkonsolideringstryck i kontrollleden vid hopslagning av försöken och nära signifikans i försöken enskilt med p-värden på 0,14 respektive 0,06. Det stämmer med resultaten från genomsläppligheten som visar på högre genomsläpplighet för packade led och kan förmodligen till stor del också förklaras av fenomenet med en grövre aggregatstruktur efter packning som lättare ger håligheter i cylindrarna vid provtagningen. För 30 och 50 cm djup finns ingen signifikans och således inga skillnader. En möjlig felkälla vid mätningarna i ödometern var att cylindrarna från sandbädden i varierande grad behöll fuktigheten från den dränerade nivån eftersom tiden mellan sandbädden och tryckningen kunde uppgå till fyra veckor.

Resultaten från deformationen visar endast på signifikans då försöken slås ihop och på 30 cm djup och på maxbelastningen 8 bar, tendens till skillnad erhålls då också vid belastningen 1 bar. Att deformationen i dessa fall är mindre för de packade leden är förväntat och ett tecken på att jorden i de packade leden på 30 cm djup redan deformerats. Också genomsläppligheten och porositeten är signifikant lägre för djupet 30 cm vilket talar för att en förändring skett av behandlingen.

### 5.4 Porositet

Resultatet för porositeten som framgår av figur 9 och 10 är förväntat med en tendens till minskad porvolym i det packade leden. Porositeten, som skulle kunna ses som packningsgradens främsta markör, är också kopplad till resultaten för såväl penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet i matjorden för försök 758, som för förkonsolideringstrycket i matjorden i försök 758 och 759.

### 5.5 Aggregathållfasthet

Aggregathållfastheten från matjorden (0- 5 cm) i försök 758 påverkades inte synbart i resultaten av behandlingen medan den för 759 uppvisade en tydlig och signifikant skillnad med högre hållfasthet i aggregat från packade led. Arvidsson och Håkansson (1996) visade i

en studie om packningseffekter efter plöjning att aggregathållfastheten var signifikant högre i packade led, både direkt efter plöjning men också efter tidigare års packning vilket överensstämmer med resultaten från 759.

## 5.6 Infärgning av markprofilen

Inga signifikanta skillnader mellan behandlingarna i infärgningsförsöket kunde fastslås för något av de två försöken 758 och 759, dock fanns en tendens till mindre andel infärgad jord för packade led. Vid jämförelse med två andra infärgningsförsök, Sjöholm (2008) och Yngwe (2007), kan konstateras att metoden fungerar väl för att studera vattenrörelser i markprofilen, men att skillnader mellan behandlingar som packning, val av jordbearbetning, bearbetningsdjup och tid för bearbetning är svåra att identifiera. Både Sjöholm och Yngwe visar i likhet med dessa försök att andelen infärgad jord minskar från ytan ner till transportsulan vid omkring 30 cm djup där den är som lägst. Detta kan förklaras av förekomsten av de grova och till viss del permanenta sprickor i transportsulan till vilka markvätskeflödet koncentreras. Den tendens till mindre andel infärgad jord i dessa försök skulle således kunna förklaras av att packningen lett till större aggregat med större sprickor i transportsulan efter upptorkning som följd. Vidare kan ses i likhet med resultaten från Sjöholm (2008) och Yngwe (2007), att andelen infärgad jord i försök 758 och 759 tenderade att öka under transportsulan där aggregatstrukturen förbättrades.

## 6. Slutsatser

Om man summerar resultaten i detta försök och delar in de för respektive djup ser det ut enligt nedan. Om det endast föreligger tendens till statistisk signifikans (p-värde i intervallet 0,05-0,15) mellan packade och opackade led anges det.

- Skillnader i matjorden
  - Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet var högre för packade led i försök 758
  - Hydrauliska konduktiviteten var lägre för packade led i försök 759
  - Aggregathållfastheten var högre för packade led i försök 759
- Skillnader på 30 cm djup
  - Hydrauliska konduktiviteten var lägre för packade led i försök 758 och 759
  - Infärgning av markprofilen visade på mindre andel infärgad jord för packade led i försök 759 (tendens)
- Skillnader på 50 cm djup
  - Penetrationsmotstånd och skjuvhållfasthet var högre för packade led i försök 759 (tendens)
  - Infärgning av markprofilen visade på mindre andel infärgad jord för packade led i försök 759 (tendens)

Generellt är det flest signifikanta resultat från prover i matjorden, medan det vid 50 cm djup endast ger resultat med tendens till signifikans. Det signalerar om att packningens påverkan på jorden på större djup är mindre och således är svårigheten att mäta skillnader av en behandling på lite större djup svårare. Förändringar i matjorden efter en packning är relativt lätta att mäta och även att se i form av en grövre aggregatstruktur och lägre genomsläpplighet vid blöta förhållanden. Skillnaden i skördeutfallet för packade respektive opackade led (se tabell 3) är stor och visar att de uppmätta skillnaderna för respektive mätning i framförallt matjorden och på 30 cm djup har en påverkan på grödan. Packningen vid 30 respektive 50 cm djup, oavsett omfattning, bör betraktas som allvarlig på grund av de långtidseffekter som den kan medföra. Den packning med dumper som genomfördes under november månad i försöken och som låg till grund för denna studie motsvarar axel- och ringtryck på en sexradig betupptagare. Med tanke på att sockerbetor ibland tas upp under ogynnsamma markförhållanden sent på året utgör detta en förhöjd risk för skador av packningen på både lång och kort sikt.

Jordens vattenhalt är som nämnt i bakgrunden en av de mest avgörande faktorerna för packningens omfattning och varierar naturligt med årsmånen, därför är försök och fältstudier under varierande förhållanden fortsatt viktig.

## 7. Referenser

- Alakukku, L. 1997. Properties of Fine-textured Subsoils as Affected by High Axle Load Traffic, *Soil and Plant Science*, 47, ss. 81-88
- Arvidsson, J. 1996. Tryck- och tryckverkningar av olika däcktyper, Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, 90, Jordbearbetningsavdelningens årsrapport 1995, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö, ss. 40- 44.
- Arvidsson, J. 2001. Subsoil compaction caused by heavy sugar beet harvesters in southern Sweden, *Soil & Tillage Research*, 60, ss. 67- 78.
- Arvidsson, J, Feiza, V. 1995. Låga ringtryck i odling med och utan plöjning, Meddelanden från jordbearbetningsavdelningen, Nr 18, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö, 20 s.
- Arvidsson, J., Håkansson, I. 1996. Does soil compaction persist after ploughing - Results from 21 long-term field experiments. *Soil and Tillage Research*, 39, ss. 175-198.
- Arvidsson, J., Keller, T. 2004. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, 77, ss. 85-95.
- Arvidsson, J, Pettersson, O. 1995. Jordpackning och markstruktur. Aktuell från lantbruksuniversitetet 435.
- Bengough, A. G., Mullins, C. E. 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, 41.
- Danfors, B. 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Research*, 29, ss. 135-144.
- Flury, M., Fluhler, H. 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A Field study. *Water resources research*, no. 7.
- Flury, M., Fluhler, H. 1995. Tracer Characteristics of Brilliant Blue FCF, *Soil Science Society of America Journal*, 59, ss. 22- 27.
- Gunnarsson, A, Rydén, A. 2007. Infärgning av jord som verktyg för ökad förståelse av jordens komplexa funktioner i sockerbetsodling. SBU Sockernäringens BetodlingsUtveckling AB, Rapport 2007-906:6.
- Gustafsson, K, Arvidsson, J, Keller, T. 2003. Dragkraftsbehov för plog, kultivator och tallriksredskap vid olika markvattenhalter. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen. Nr 106. Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö.
- Herrick, J.E, Jones, T.L. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance, *Soil Science Society America Journal*, 66, ss. 1320- 1324.

- Håkansson, I. 2000. Packning av åkermark vid maskindrift. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen. Nr 99. Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö.
- Håkansson, I, Reeder, R. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load- extent, persistence and crop response, *Soil & Tillage Research*, 29, ss. 277- 304.
- Keller, T, Arvidsson, J. 2002. Olika metoder för att bestämma markens förkonsolideringstryck. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, nr 103, Avd. för jordbearbetning, SLU, Uppsala, ss. 64- 68.
- Kouwenhoven, J. K., Perdok, U. D., Boer, J., Oomen, G. J. M., 2002. Soil management by shallow mouldboard ploughing in The Netherlands. *Soil & Tillage Research*, 65, ss. 125- 139
- Larsson, R. 2008. Jords egenskaper. Statens geologiska institut. Information 1, ISSN 0281-7578
- Myrbeck, Å, Arvidsson, J, Keller, T. 2003. Plöjningstidpunktens inverkan på markstruktur, växtproduktion och kväveutlakning på lerjord. Slutrapport från försök 1999- 2002. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen, nr 105. Avd. för jordbearbetning, SLU, Uppsala.
- Nordström, N. 2001. Jordbearbetning på hösten- inverkan på skörd, markstruktur och kväveminalisering. Meddelande från jordbearbetningsavdelningen, nr 34, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för markvetenskap. ISSN 1102-6995.
- Sjöholm, N., 2008. Inverkan av bearbetningsdjup på markstrukturen i försök med plöjningsfri odling i Skåne och Halland. Meddelande från jordbearbetningsavdelningen, nr 57, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för markvetenskap. ISSN 1102-6995.
- Yngwe, J., 2007. Djup icke vändande bearbetning till sockerbetor. Meddelande från jordbearbetningsavdelningen, nr 55, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för markvetenskap. ISSN 1102-6995.

Tack till följande personer som på olika sätt har bidragit med kunskap, hjälp och engagemang till detta examensarbete:

Johan Arvidsson  
Ingrid Wesström  
Abraham Joel  
Mona Mossadeghi  
Christina Öhman  
Mats Larsbo  
Berth Mårtensson  
Aron Westlin  
Tomas Keller  
Bibbi Manngård  
Elisabeth Bölenius  
Arvid Lindgren  
Gustav Magnusson-Kroon